

1 Ab-
1 Co-
e der

VERFAHREN ZUM EINMESSEN EINES ARBEITSPUNKTES VON WERKZEUGEN FÜR INDUSTRIEROBOTER

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Einmessen eines Arbeitspunktes von Werkzeugen für Industrieroboter mit einer Einmessvorrichtung, die mindestens

5 zwei jeweils mit einem Scheitelwinkel α größer Null winklig zueinander stehende und sich in einem Kreuzungspunkt kreuzende Lichtschranken hat und folgende Schritte aufweist:

10 a) Festlegen von IST-TCP-Lagekoordinaten eines SOLL-
Arbeitspunktes des Werkzeugs bezogen auf einen
Werkzeugbasispunkt eines
Industrieroboters und eines auf den Arbeitspunkt bezogenen TCP-
Koordinatensystems,

15 b) Verfahren des Werkzeugs mit Bezug auf das TCP-
Koordinatensystem durch die Lichtschranken so, dass die dem
Arbeitspunkt entsprechende Werkzeugspitze des Werkzeugs die
Lichtschranken unterbricht.

20 Industrieroboter haben zum Anfahren beliebiger Punkte innerhalb eines
Arbeitsraums mehrere miteinander verbundene Arme, einen Handflansch am
Ende des letzten Arms der miteinander verketteten Arme, und ein Werkzeug,
das an den Handflansch angebracht ist. Das Werkzeug kann beispielsweise ein
Greifer, ein Schweißkopf oder ähnliches sein.

oter (8)
tehende
ageko-
erobo-
ekt zum
CP) ent-
aten bei
aten für
ST-TCP
on dem
der be-

Die Lage und Orientierung des Handflansches oder des Arbeitspunktes eines an den Handflansch angebrachten Werkzeugs kann in einem ortsfesten roboterunabhängigen Weltkoordinatensystem oder einem ortsfesten auf einen Verankerungspunkt des Industrieroboters bezogenen Basiskoordinatensystem 5 erfolgen. Die Beschreibung der Lage der Freiheitsgrade, d. h. der Achsen und der Handorientierung erfolgt hingegen in Roboterkoordinaten, wobei ausgehend von der Grundachse des Roboters, d. h. des Basiskoordinatensystems, für jeden Arm ein Achsen-Roboterkoordinatensystem definiert ist, das die relative Lage jeder Achse bezogen auf ihre vorgehende Achse beschreibt. Der 10 Zusammenhang der Achsen-Roboterkoordinatensysteme eines Industrieroboters wird durch definierte Koordinatentransformationen beschrieben. Durch Vorgabe der Lage und der Orientierung des Handflansch oder des Arbeitspunktes eines Werkzeugs im Weltkoordinatensystem können somit durch Koordinatentransformation die Achsen-Roboterkoordinaten 15 berechnet werden, um die einzelnen Achsen des Industrieroboters ansteuern zu können.

Die Lage eines Arbeitspunktes eines Werkzeuges, das an den Handflansch des Industrieroboters angebracht wird, wird durch sogenannte TCP-Lagekoordinaten beschrieben. Die Programmierung des Industrieroboters erfolgt auf der Basis des Handflanschs und der festgelegten TCP-Lagekoordinaten. Die TCP-Lagekoordinaten werden bei jedem Werkzeug mitgeliefert und sind als Tool-Center-Point (TCP) bekannt. Die TCP-Lagekoordinaten sind ebenso wie die Achsen-Roboterkoordinaten jeweils ein 20 Vektor mit sechs Dimensionen. Die ersten drei Koordinaten definieren die Lage des Arbeitspunktes relativ zu dem Werkzeugbasispunkt des Industrieroboters, d. h. des Befestigungspunktes des Werkzeugs an dem Handflansch. Die anderen drei Koordinaten definieren die Orientierung der Achsen des 25 Arbeitspunktes relativ zu dem Werkzeugbasispunkt.

Der Arbeitspunkt des Werkzeugs kann beispielsweise die Spitze eines Schweißkopfes sein. Nur wenn die TCP-Lagekoordinaten exakt bekannt sind, kann der Arbeitspunkt des Werkzeugs präzise verfahren werden.

5 Im Betrieb kann sich der Arbeitspunkt des Werkzeugs jedoch durch Werkzeugverschleiß, Verbiegung etc. ändern, was zu einer fehlerhaften Positionierung des Arbeitspunktes des Werkzeugs führt.

10 Es besteht daher die Notwendigkeit den Arbeitspunkt von Werkzeugen hochgenau einzumessen.

In der EP 0 417 320 A1 ist ein Verfahren zum Einmessen des Arbeitspunktes (TCP) des Werkzeugs eines Industrieroboters beschrieben, bei dem ein Einstellpunkt an dem Handflansch des Roboterarms festgelegt ist, wobei die

15 Position des Einstellpunktes relativ zu dem Handflansch bekannt ist. Weiterhin ist eine Referenzspitze im Arbeitsraum des Industrieroboters aufgestellt. Zum Einmessen des Arbeitspunktes wird die Spitze des Werkzeugs auf die Referenzspitze aufgesetzt und die Position und Orientierung der Werkzeugspitze in einem Basiskoordinatensystem bestimmt. Dann wird der
20 Einstellpunkt des Handflansches auf die Referenzspitze aufgesetzt und die Position und Orientierung des Einstellpunktes in dem Koordinatensystem des Handflansches bestimmt. Zudem wird die Position und Orientierung der Referenzspitze in dem Bezugskoordinatensystem bestimmt und aus den drei Matrizen eine Transformationsmatrix zur Bezeichnung der TCP-
25 Lagekoordinaten des Arbeitspunktes des Werkzeugs berechnet.

Das Einmessen erfordert einen mehrstufigen Verfahr-Vorgang sowie Koordinatentransformationen.

30 Aus dem US-Patent 6,352,354 B1 ist ein Lichtpunktelelement zur Erzeugung eines Lichtpunktsignals an einem Arbeitspunkt eines Industrieroboter-

Werkzeugs beschrieben. Hierdurch kann die genaue Position des Werkzeugs während einer Lernphase beschrieben werden.

In dem US-Patent 5,929,584 ist ein Verfahren zum Einmessen eines 5 Arbeitspunktes von Werkzeugen mit einem Kalibrierblock beschrieben, der vertikale und horizontale Flächen hat. Durch Bewegung des Werkzeugs von einer Startposition bis zu einem Berührungs punkt des Werkzeugs an einer der Flächen und Zurückfahren des Werkzeugs zum Startpunkt und Wiederholen 10 des Vorgangs für die andere Fläche werden die TCP-Lagekoordinaten des Arbeitspunktes berechnet. Hierzu ist nachteilig eine aufwändige Koordinatentransformation von dem Bezugskoordinatensystem über die einzelnen Roboterkoordinaten bis zu dem Handflansch erforderlich, um aus den Bezugskoordinaten die TCP-Lagekoordinaten im TCP-Koordinatensystem zu ermitteln.

15

5

10

15

20

25

30

30

In der DE 37 24 656 T2 ist eine mehrdimensionale Messmaschine mit Gabellichtschranke beschrieben, die sich an einem Kreuzungspunkt treffen. Auf Grund der mehreren Lichtschranken, die alle in der gleichen Ebene liegen, kann eine berührungslose Antastung des Werkstücks von unterschiedlichen 20 Richtungen, aber in der selben Antastebene erfolgen.

Das US-Patent 5,177,563 offenbart eine Gabellichtschranke zur Kalibrierung eines Roboterarms, dass die Werkzeugsspitze solange verfahren wird, die bis diese im dem Kreuzungspunkt der Lichtschranken liegt und beide 25 Lichtschranken gleichzeitig ausgelöst sind. Die TCP-Lagekoordinaten in diesem Kreuzungspunkt werden mit SOLL-TCP-Koordinaten verglichen und hieraus eine Abweichung ermittelt. Die Suche des Kreuzungspunkts ist allerdings langwierig.

30 Aufgabe der Erfindung ist es daher, ein verbessertes Verfahren zum Einmessen eines Arbeitspunktes von Werkzeugen für Industrieroboter zu schaffen.

Die Aufgabe wird mit dem gattungsgemäßen Verfahren erfindungsgemäß gelöst durch die weiteren Schritte von:

- 5 c) Aufnehmen von IST-TCP-Lagekoordinaten bei der Unterbrechung einer jeweiligen Lichtschranke,
- 10 d) Bestimmen der Differenzen zwischen SOLL-TCP-Lagekoordinaten für die Unterbrechung der Lichtschranken bei einem SOLL-Arbeitspunkt und den entsprechenden aufgenommenen IST-TCP-Lagekoordinaten für den IST-Arbeitspunkt,
- 15 e) Berechnen der Abweichung des IST-Arbeitspunktes von dem SOLL-Arbeitspunkt für die durch die Lichtschranken vorgegebene Anzahl von Ebenen aus den Differenzen und der bekannten Lage und Scheitelwinkeln α der Lichtschranken.

Es wird somit vorgeschlagen, aus der bekannten durch die Lichtschranken aufgespannten Ebene und dem mindestens einen Scheitelwinkel α die Abweichung des IST-Arbeitspunktes von dem SOLL-Arbeitspunkt aus den IST-TCP-Lagekoordinaten für jede Achse des Koordinatensystems, die jeweils beim Unterbrechen einer Lichtschranke festgehalten werden, auf die Abweichung des Arbeitspunktes für einzelne Achsen des Koordinatensystems zu berechnen. Damit entfällt die Suche nach dem Kreuzungspunkt zur Bestimmung eines Arbeitspunktes. Vielmehr kann der Roboter in die Einmessvorrichtung so verfahren werden, als ob der SOLL-Arbeitspunkt von der Werkzeugspitze direkt erreicht werden soll. Aus den bei einer Arbeitspunktverschiebung auftretenden zeitlich versetzten Unterbrechungen der einzelnen Lichtschranken, deren Orientierung einen Zusammenhang mit dem Koordinatensystem des Industrieroboters aufweist, kann dann die Abweichungen des Arbeitspunktes bestimmt werden.

Es ist vorteilhaft, wenn anschließend die TCP-Lagekoordinaten um die berechnete Abweichung des IST-Arbeitspunktes von den SOLL-Arbeitspunkt für die Ebenen eines dem TCP-Lagekoordinaten zu Grunde liegenden Koordinatensystems korrigiert wird.

5

Besonders vorteilhaft ist es auch, wenn der SOLL-Arbeitspunkt mit den TCP-Lagekoordinaten festgelegt wird, bei denen die dem Arbeitspunkt entsprechende Werkzeugspitze alle Lichtschranken in einem gemeinsamen Kreuzungspunkt gleichzeitig unterbricht.

10

Deutlicher wird die Erfindung anhand einer vorteilhaften Ausführungsform, bei der zwei Lichtschranken vorgesehen sind, die sich mit einem Scheitelwinkel α von 90° kreuzen und eine erste Ebene eines Koordinatensystems aufspannen, wobei die erste Lichtschranke einer ersten Achse y und die zweite

15 Lichtschranke einer zweiten Achse z des Koordinatensystems entspricht.

5

10

15

20

25

30

Aus der beim Unterbrechen der ersten Lichtschranke bestimmten Abweichung des IST-Arbeitspunktes vom SOLL-Arbeitspunkt kann auf Grund der definierten Zuordnung der Lichtschranken zu der ersten und zweiten Achse die 20 Abweichung des Arbeitspunktes für die erste Achse und aus der beim Unterbrechen der zweiten Lichtschranke bestimmten Abweichung des IST-Arbeitspunktes vom SOLL-Arbeitspunkt die Abweichung des Arbeitspunktes für die zweite Achse bestimmt werden.

25 Sofern die TCP-Lagekoordinaten, die beim Unterbrechen der Lichtschranken bestimmt werden, im selben Koordinatensystem beschrieben sind, würde je nach Werkzeugverbiegung beispielsweise beim Unterbrechen der ersten Lichtschranke die Abweichung der y -Koordinate der TCP-Lagekoordinaten und beim Unterbrechen der zweiten Lichtschranke die Abweichung der z -Koordinate der TCP-Lagekoordinaten bestimmt und gegebenenfalls die TCP-Lagekoordinaten 30 entsprechend korrigiert werden.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

Figur 1 - perspektivische Ansicht einer erfindungsgemäß^{en} Einmessvorrichtung mit zwei sich kreuzenden Lichtschranken;

Figur 2 - Draufsicht auf die Einmessvorrichtung nach Figur 1;

Figur 3 - Skizze eines Industrieroboters mit mehreren Armen und Basiskoordinatensystem sowie Achsenkoordinatensystemen;

Figur 4 - Skizze der Verlagerung des Arbeitspunktes eines Werkzeugs nach Verschleiß in Bezug auf ein TCP-Koordinatensystem.

Die Figur 1 lässt eine erfindungsgemäß^e Einmessvorrichtung 1 in perspektivischer Ansicht erkennen. Die Einmessvorrichtung 1 hat einen auf einer Seite offenen Rahmen 2 mit zwei voneinander beabstandeten parallelen Schenkeln 3a, 3b. Die Einmessvorrichtung 1 ist somit U-förmig. Die Schenkel 3a, 3b sind integral mit einer Halteplatte 4 verbunden, mit der die Einmessvorrichtung 1 ortsfest in dem Arbeitsraum des Industrieroboters montiert werden kann.

In den Schenkeln 3a, 3b sind diagonal hierzu ausgerichtete Lichtschranken 5a, 5b vorgesehen, die mit einem Scheitelwinkel α von 90° zueinander verlaufen und sich in einem Kreuzungspunkt R im Zwischenraum zwischen den Schenkeln 3a, 3b treffen. Hierzu ist jeweils ein Sender 6 und ein Empfänger 7 pro Lichtschranke 5a, 5b an einem vorderen Ende eines ersten Schenkels 3a und am hinteren Ende des anderen Schenkels 3b für die erste Lichtschranke 5a bzw. an dem hinteren Ende des ersten Schenkels 3a und dem vorderen Ende des zweiten Schenkels 3b für die zweite Lichtschranke 5b angebracht. Auf diese Weise wird eine Gabellichtschranke geschaffen, die vorzugsweise als Infrarot-Lichtschranke ausgebildet ist.

Die Figur 2 lässt die Einmessvorrichtung 1 in der Draufsicht erkennen. Es wird deutlich, dass die Lichtschranken 5a, 5b diagonal zwischen den Schenkeln 3a und 3b verlaufen und sich im Zwischenraum der Schenkel 3a, 3b in dem

5 Kreuzungspunkt R treffen.

Ein Arbeitspunkt TCP eines Werkzeugs für einen Industrieroboter, beispielsweise die Werkzeugspitze, wird zum Einmessen des Arbeitspunktes TCP so verfahren, dass ein SOLL-Arbeitspunkt TCP_{SOLL} angefahren wird, der

10 vorzugsweise dem Kreuzungspunkt R der Einmessvorrichtung 1 liegt. In diesem Falle sind beide Lichtschranken 5a, 5b durch die Werkzeugspitze unterbrochen, so dass ein Schaltsignal erzeugt wird.

Das Einmessverfahren wird im Folgenden näher erläutert.

15

Die Figur 3 lässt eine Skizze eines Industrieroboters 8 erkennen. Ein Industrieroboter 8 hat ein Basiskoordinatensystem \bar{O}_0 oder Weltkoordinatensystem, das ortsfest in Bezug auf das Fundament des Industrieroboters 8 ausgerichtet ist. An dem Sockel 9 befindet sich eine Kette von über Gelenke 10 miteinander verbundene Arme 11. Für jeden dieser Arme 11 ist ein Achsen-Koordinatensystem $\bar{O}_1, \bar{O}_2, \bar{O}_3$ definiert, mit dem Position und Orientierung des jeweiligen Endes des entsprechenden Arms 11 in Bezug auf das zugeordnete Gelenk 10, mit der Arm 11 mit dem vorhergehenden Arm 11 verbunden ist, beschreibt.

25

An dem Ende der Kette von Armen 11 befindet sich eine Handfläche 12, an die das Werkzeug 13 angebracht ist.

Für das Werkzeug 13 ist ein TCP-Koordinatensystem \bar{O}_{TCP} festgelegt, das

30 einen Ursprung in dem Arbeitspunkt TCP des Werkzeugs hat. Für das Werkzeug 13 werden auf der Basis dieses TCP-Koordinatensystems O_{TCP} TCP-Lagekoordinaten bereitgestellt, die die Position und Orientierung des

5

10

15

20

25

30

Arbeitspunktes TCP in Bezug auf den Werkzeugbasispunkt W am Handflansch 12, d. h. in Bezug auf den Befestigungspunkt des Werkzeugs 13 an dem Industrieroboter 8 definiert.

- 5 Um die TCP-Lagekoordinaten im Betrieb bezogen auf den Werkzeugbasispunkt W des Industrieroboters 8 schnell und mit geringen Rechenaufwand einmessen zu können, wird die Werkzeugspitze des Werkzeugs 13 in den SOLL-Arbeitspunkt TCP_{SOLL} der ortsfest montierten Einmessvorrichtung 1 auf der Basis des TCP-Koordinatensystems \tilde{O}_{TCP} verfahren. Es erfolgt somit eine auf 10 den Arbeitspunkt TCP bezogene Interpolation des Verfahrweges beim Führen des Werkzeugs 13 durch den Industrieroboter 8. Der Ursprung des TCP-Koordinatensystems \tilde{O}_{TCP} wird hierbei stationär in Bezug auf die festgelegten TCP-Lagekoordinaten des Arbeitspunktes TCP gehalten.
- 15 Beim Unterbrechen der ersten Lichtschranke werden die TCP-Lagekoordinaten festgehalten und die Abweichung des IST-Arbeitspunktes TCP_{IST} vom SOLL-Arbeitspunkt TCP_{SOLL} für die Achse y bestimmt. Entsprechend wird beim Unterbrechen der zweiten Lichtschranke die Abweichung des IST-Arbeitspunktes TCP_{IST} vom SOLL-Arbeitspunkt TCP_{SOLL} für die zweite Achse z bestimmt. Diese Abweichungen für die erste Achse y und die zweite Achse z 20 entsprechen unter Berücksichtigung, dass die beiden Lichtschranken eine gemeinsame Ebene aufspannen, die für die dritte Achse x im Nullpunkt durchfahren wurde, der Verschiebung des Arbeitspunktes TCP im dreidimensionalen Raum. Die Reihenfolge der Unterbrechung ergibt sich durch 25 die Werkzeugbiegung bzw. die Durchfahrtsteuerung.

Der tatsächliche Werkzeugmittelpunkt wird durch den Mittelpunkt zwischen Unterbrechung und erneuter Freigabe einer Lichtschranke bestimmt. Aus der Dauer der Unterbrechung kann zudem der Durchmesser des Werkzeugs 30 bestimmt werden.

Aus der Abweichung kann somit ohne aufwendige Suche des Kreuzungspunktes R direkt die Verschiebung des Arbeitspunktes TCP bei Verschleiß oder Verbiegen des Werkzeugs 13 in den TCP-Koordinaten bestimmt werden. Es entfällt auch die Notwendigkeit, aufwändige
5 Koordinatentransformationen durchzuführen.

5

10

15

20

25

30

Die Figur 4 lässt das Werkzeug 13 mit dem TCP-Koordinatensystem \tilde{O}_{TCP} erkennen, dass seinen Ursprung im Arbeitspunkt TCP des Werkzeugs 13 hat. Für den Fall der skizzierten Verkrümmung des Werkzeuges verlagert sich der
10 Arbeitspunkt TCP_1 in Bezug auf den vorher festgelegten ursprünglichen Arbeitspunkt TCP_0 . Die TCP-Lagekoordinaten sind um diese Verschiebung $\Delta TCP_0 = TCP_1 - TCP_0$ zu korrigieren. Da erfindungsgemäß die Steuerung des Industrie-Roboters 8 in Bezug auf das TCP-Koordinatensystem \tilde{O}_{TCP} erfolgt,
wird die Differenz zwischen den ursprünglich festgelegten TCP-
15 Lagekoordinaten TCP_0 und die Lage des neuen Arbeitspunktes TCP_1 eines verschlissenen Werkzeugs 13 aus den Differenzen Δy beim Unterbrechen der ersten Lichtschranke für die y-Achse und Δz beim Unterbrechen der zweiten Lichtschranke für die z-Achse bestimmt. Da die durch die Lichtschranken aufgespannten Ebene bei x gleich Null liegt, kann zu dem die Abweichung Δx
20 zum x-Wert des SOLL-Arbeitspunktes berechnet werden.

Abweichungen der Werkzeuglänge in x-Richtung können beispielsweise durch eine zweite Messfahrt bestimmt werden, indem das Werkzeug in x-Achsrichtung von oben bzw. unten in die sich kreuzenden Lichtschranken
25 gefahren wird.

Sofern die Lichtschranken nicht mit den x-, y- und z-Achsen übereinstimmen, können aus der bekannten Orientierung der Lichtschranken und dem Scheitelwinkel α durch Koordinatentransformation die Abweichungen in x-, y-
30 und z-Achsenrichtung berechnet werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Einmessen eines Arbeitspunktes (TCP) von Werkzeugen

(13) für Industrieroboter (8) mit einer Einmessvorrichtung (1), die

5 mindestens zwei jeweils mit einem Scheitelwinkel (α) größer Null winklig zueinander stehende und sich in einem Kreuzungspunkt (R) kreuzende Lichtschranken hat, mit den Schritten:

10 a) Festlegen von SOLL-TCP-Lagekoordinaten eines SOLL-Arbeitspunktes (TCP_{SOLL}) des Werkzeugs (13) bezogen auf einen Werkzeugbasispunkt (W) des Industrieroboters (8) und eines auf den Arbeitspunkt (TCP) bezogenen TCP-Koordinatensystems,

15 b) Verfahren des Werkzeugs (13) direkt zum SOLL-Arbeitspunkt mit Bezug auf das TCP-Koordinatensystem durch die Lichtschranken so, dass die dem Arbeitspunkt (TCP) entsprechende Werkzeugspitze des Werkzeugs (13) die Lichtschranken unterbricht,

20 gekennzeichnet durch

c) Aufnehmen von IST-TCP-Lagekoordinaten bei der Unterbrechung einer jeweiligen Lichtschranke,

25 d) Bestimmen der Differenzen zwischen den SOLL-TCP-Lagekoordinaten für die Unterbrechung der Lichtschranken bei einem Soll-Arbeitspunkt (TCP_{SOLL}) und den entsprechenden aufgenommenen IST-TCP-Lagekoordinaten für den IST-Arbeitspunkt (TCP_{IST}),

30 e) Berechnen der Abweichung des IST-Arbeitspunktes (TCP_{IST}) von dem Soll-Arbeitspunkt (TCP_{SOLL}) für die durch die Lichtschranken

vorgegebene Anzahl von Ebenen aus den Differenzen und der bekannten Lage und Scheitelwinkel (α) der Lichtschranken.

2. Verfahren nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch Korrigieren der TCP-Lagekoordinaten um die berechnete Abweichung zwischen den festgelegten IST-TCP-Lagekoordinaten um die berechnete Abweichung des IST-Arbeitspunktes (TCP_{IST}) und von dem SOLL-Arbeitspunkt (TCP_{SOLL}) für die Ebenen eines den TCP-Lagekoordinaten zu Grunde liegenden Koordinatensystems.

10

3. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Soll-Arbeitspunkt (TCP_{SOLL}) mit den TCP-Lagekoordinaten festgelegt wird, bei denen die dem Arbeitspunkt (TCP) entsprechende Werkzeugspitze alle Lichtschranken in einem gemeinsamen Kreuzungspunkt (R) gleichzeitig unterbricht.

15

4. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei zwei Lichtschranken vorgesehen sind, die sich mit einem Scheitelwinkel α von 90° kreuzen und eine erste Ebene eines Koordinatensystems aufspannen, und wobei die erste Lichtschranke einer ersten Achse (y) und die zweite Lichtschranke einer zweiten Achse (z) des Koordinatensystems entspricht, dadurch gekennzeichnet, dass aus der beim Unterbrechen der ersten Lichtschranke bestimmten Abweichung des IST-Arbeitspunktes (TCP_{IST}) vom SOLL-Arbeitspunkt (TCP_{SOLL}) die Abweichung des Arbeitspunktes (TCP) für die erste Achse (y) und aus der beim Unterbrechen der zweiten Lichtschranke bestimmten Abweichung des IST-Arbeitspunktes (TCP_{IST}) vom SOLL-Arbeitspunkt (TCP_{SOLL}) die Abweichung des Arbeitspunktes (TCP) für die zweite Achse (z) bestimmt wird.

20

25

30

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Bestimmen der IST-TCP-Lagekoordinaten als mittlere IST-TCP-

5

Lagekoordinate zwischen dem Zeitpunkt der Unterbrechung einer Lichtschranke und der folgenden Freigabe der Lichtschranke.

6. Verfahren nach Anspruch 5, gekennzeichnet durch Bestimmung des
5 Werkzeugdurchmessers aus der Differenz der zum Zeitpunkt der Unterbrechung einer Lichtschranke und der folgenden Freigabe der Lichtschranke bestimmten IST-TCP-Lagekoordinaten.

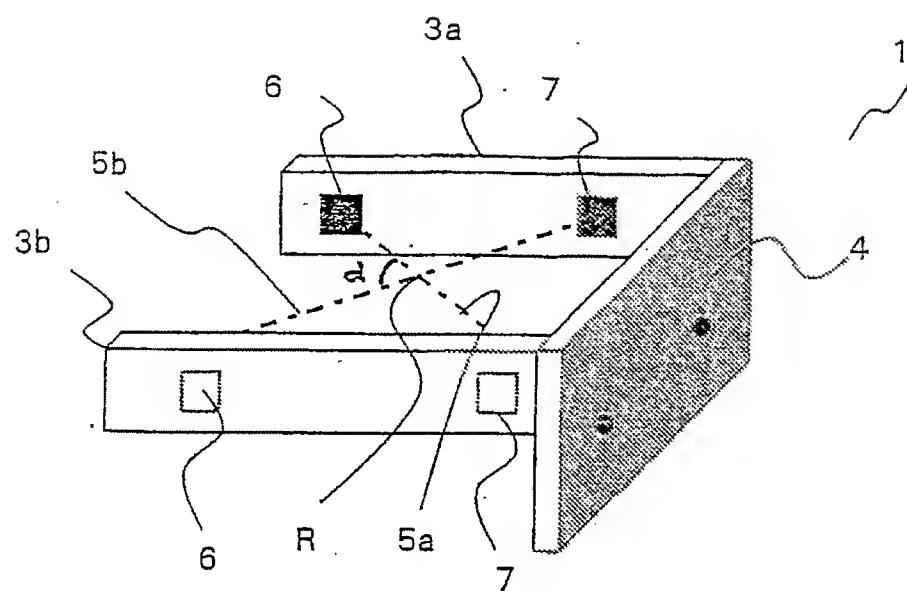


Fig. 1

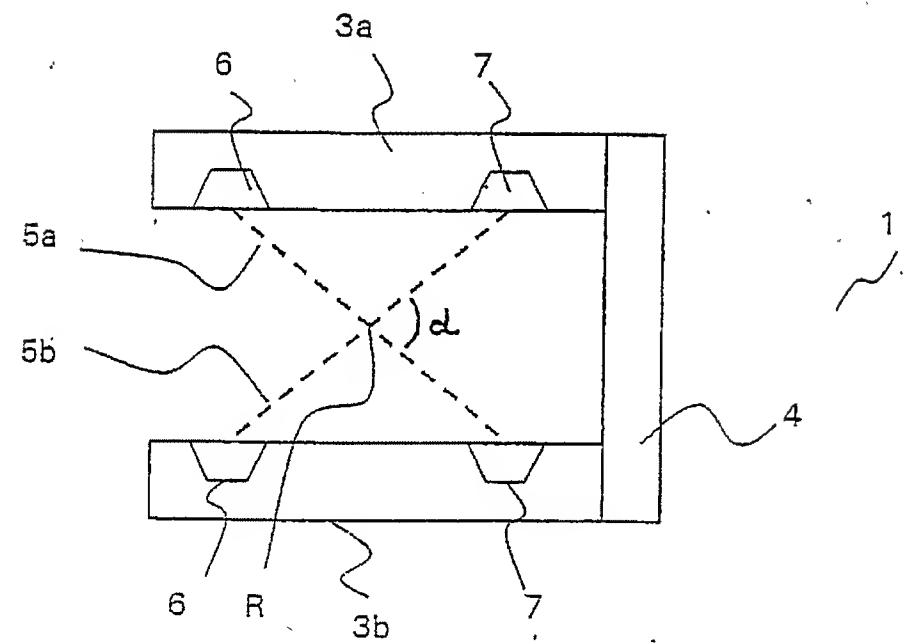


Fig. 2

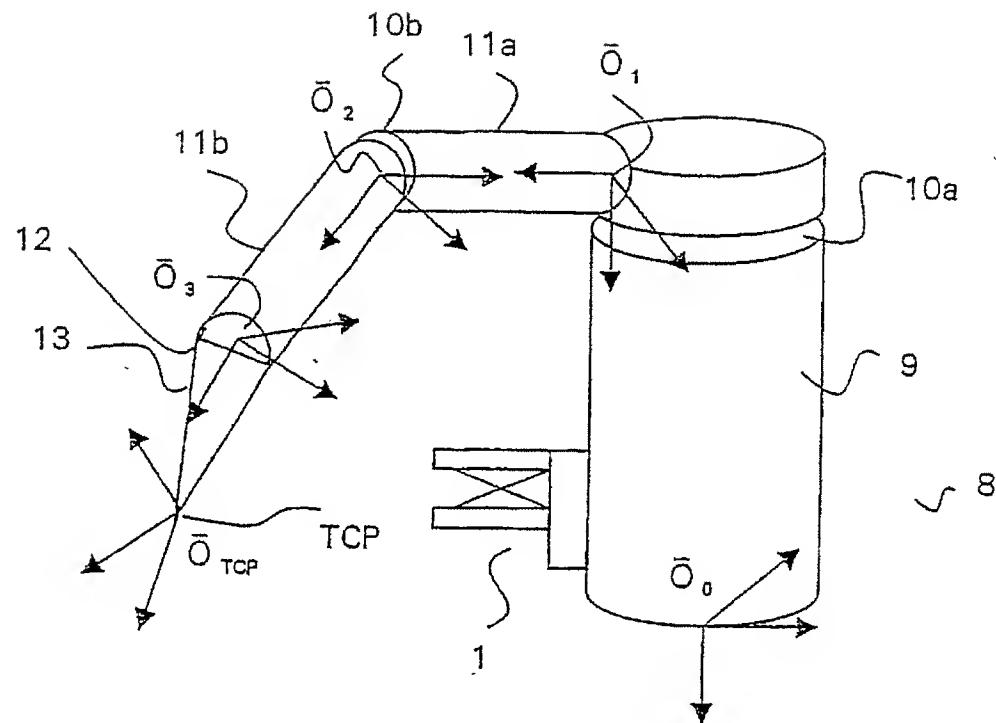


Fig. 3

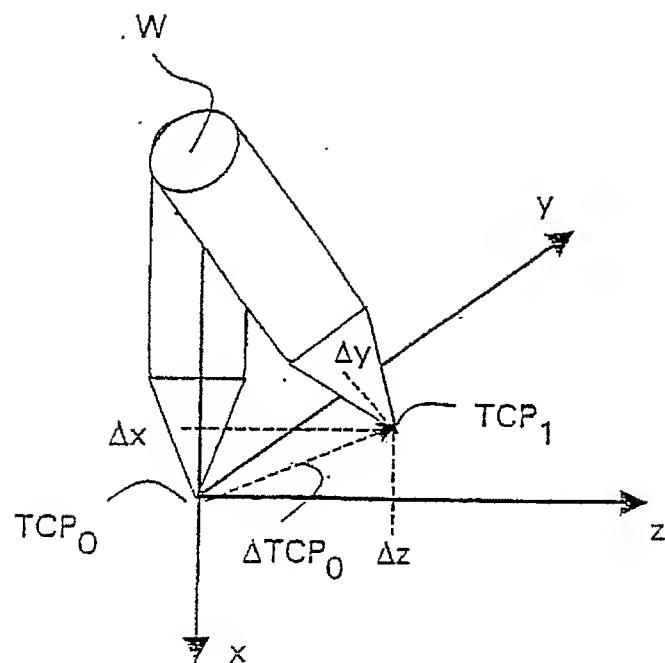


Fig. 4